

УДК 556.5

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОЛЕБАНИЯХ СТОКА РЕК БАСЕЙНА ЗАПАДНОЙ ДВИНЫ И ИХ ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ

**А. А. Волчек<sup>1</sup>, Н. Н. Филатов<sup>2</sup>, Н. В. Гнатюк<sup>3</sup>, О. П. Мешик<sup>4</sup>, С. И. Парфомук<sup>5</sup>, М. В. Борушко<sup>6</sup>, Ю. В. Радченко<sup>7</sup>, С. В. Сидак<sup>8</sup>, Ю. П. Городнюк<sup>9</sup>, А. С. Протасевич<sup>10</sup>**

<sup>1</sup> Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

<sup>2</sup> Д. г. н., профессор, член-корреспондент РАН, г. н. с., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН – обособленная организация ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия, e-mail: nfilatov@rambler.ru

<sup>3</sup> К. г. н., н. с., заместитель директора научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gnatiuk.n@gmail.com

<sup>4</sup> К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru

<sup>5</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

<sup>6</sup> Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: borushko.marina@mail.ru

<sup>7</sup> Ph. D., научный сотрудник научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yulia.rad@gmail.com

<sup>8</sup> Магистр, старший преподаватель кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

<sup>9</sup> Магистр, ассистент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodniuk99@gmail.com

<sup>10</sup> Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com

### Реферат

В статье представлены результаты исследований пространственно-временных колебаний характерных расходов воды Западной Двины и ее притоков, расположенных на территории Беларуси за период инструментальных наблюдений. Для створа Витебска рассматривался гидрологический ряд в 145 лет, с 1877 по 2021 гг.

Показано, что изменение климата увеличило неравномерность изменений стока как по бассейнам рек Западной Двины, так и его внутригодовому распределению по сезонам года, а также в зависимости от характеристик рек – большие, средние, малые. Значительные изменения стока произошли в весенний период, связанные со снижением стока весеннего половодья и более ранним его наступлением. В весенний, летний и осенний период прослеживается разная направленность изменения стока, особенно в летний период – его увеличение.

Прогноз стока на период до 2035 года в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 год. При незначительном изменении стока в среднем за год, высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохранных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном Западной Двины.

**Ключевые слова:** расход воды, годовой сток, весеннее половодье, минимальный летне-осенний сток, минимальный зимний сток, климат, прогнозные оценки.

## CONTEMPORARY TRENDS IN RUNOFF FLUCTUATIONS IN THE WESTERN DVINA BASIN RIVERS AND THEIR FORECAST ESTIMATES

**A. A. Volchak, N. N. Filatov, N. V. Gnatiuk, O. P. Meshik, S. I. Parfomuk, M. V. Borushko, Y. V. Radchenko, S. V. Sidak, Y. P. Haradniuk, A. S. Protasevich**

### Abstract

The article presents the results of studies of spatial and temporal fluctuations in the typical water discharges of the Western Dvina River and its tributaries located in the territory of Belarus during the period of instrumental observations. A hydrological series of 145 years (from 1877 to 2021) at the Vitebsk gauging station is considered.

It is shown that climate change has increased the unevenness in runoff changes, both in the basins of the Western Dvina rivers and in its intra-annual distribution by seasons of the year. Also the unevenness in runoff changes is related to the rivers watershed areas distinguished as large, medium, small. Significant changes in runoff occurred in the spring period, which are related to a decrease in the runoff of the spring flood and its earlier onset. In the spring, summer and autumn periods, different directions of runoff changes are observed, in the summer period it increases.

The runoff forecast for the period up to 2035 basically confirmed the identified trends in its change in the period from 1961 to 2015. With an insignificant change in runoff on average per year, there is a high probability of its unevenness and multidirectionality in seasons and months. Increased unevenness of the intra-annual distribution of runoff and an increase in the risk of floods caused by sharp thaws in winter, an earlier onset of spring floods and an increase in the intensity of rain floods can lead to an increase in the risk of extreme events.

The significance of river runoff assessments and forecasts in the changing climate is determined by the feasibility of their further consideration when planning water protection and water management measures related to improving the management of the Western Dvina river basins.

**Keywords:** water consumption, annual runoff, spring flood, minimum summer-autumn runoff, minimum winter runoff, climate, forecast estimates.

**Введение**

Вопросы рационального управления водными ресурсами всё чаще находятся в фокусе внимания международного сообщества с учетом нарастающего дефицита водных ресурсов на планете и постоянно растущего спроса на воду в большинстве стран.

Международное сообщество скоординировало усилия всех стран, определив 17 целей устойчивого развития на период до 2030 года, одной из которых является обеспечение наличия и распределения стока рек, а также его рационального использования и санитарии для всех [1]. Особенно это актуально для трансграничных рек [2]. Республика Беларусь является участником данной инициативы.

Большинство крупных рек Беларуси являются трансграничными, и управление водным режимом таких рек является межгосударственной задачей. Одной из первичных задач является объективная оценка

современного состояния водных ресурсов как в целом для бассейна реки, так и по отдельным странам, по которым она протекает. Ключевым вопросом в исследовании водного режима рек являются прогнозные оценки водных ресурсов на ближнюю и отдаленную перспективу. Одной из таких рек является река Западная Двина. Она одна из наиболее крупных рек Беларуси, уступая по водности лишь Днепру. Западная Двина вытекает из оз. Корякино, в 14 км юго-западнее г. п. Пено. Протекает по Тверской и Смоленской областям (Россия), Витебской области (Беларусь), далее по территории Латвии (Даугава) и впадает в Рижский залив Балтийского моря у г. Риги. Численность населения в бассейне реки в пределах Республики Беларусь составляет 1327 тыс. чел., а плотность населения – 40 чел/км<sup>2</sup>. Площади водосбора Западной Двины (Даугава) по странам, в которых он расположен, приведены в таблице 1 [3, 4, 5, 6].

**Таблица 1** – Страны, на территории которых расположен бассейн р. Западная Двина (Даугава)

Общая площадь бассейна реки, тыс. км <sup>2</sup>	Страна	Площадь водосбора в км <sup>2</sup> (% от общей площади бассейна)
87,9	Россия	24,8 (28,2)
	Беларусь	33,2 тыс. (37,8)
	Латвия	29,9 (34,0)

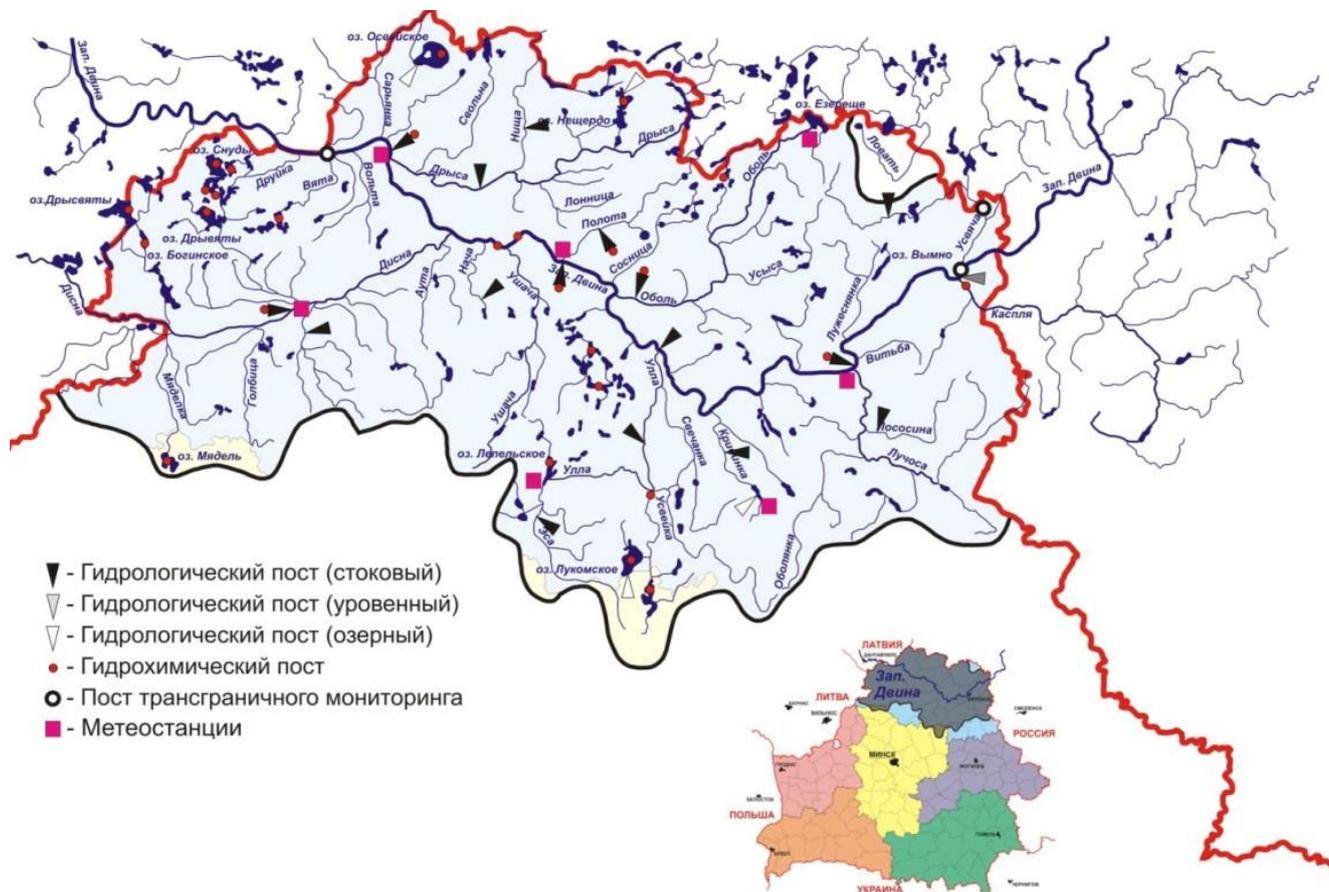
Целью настоящего исследования является установление современных тенденций в колебаниях стока рек бассейна Западной Двины на территории Беларуси и их прогнозные оценки для рационального и объективного управления водным режимом.

**Материалы и методы исследования**

Природные условия бассейна реки Западная Двина определяются географическим положением – простирается в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины. Бассейн представляет собой неширокую (100–150 км) изогнутую полосу, вытянутую

в широтном направлении и как бы открытую в сторону Балтийского моря. Он граничит с водосборами: на севере – озера Чудское и Ильмень, на востоке и юго-востоке – реки Волга и Днепр, на юге и юго-западе – река Неман. Водораздел бассейна проходит по Свенцянским грядам, восточным отрогам Белорусской гряды, Валдайской, Городокской и Латгальской (на юго-востоке Латвии, высоты – до 289 м) возвышенностям [6].

Гидрографическая сеть в бассейне Западной Двины представлена значительным количеством озёр (около 3 % всего водосбора), многочисленными реками (12 тыс.) и болотами (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Гидрографическая сеть и сеть существующих постов метеорологических и гидрологических наблюдений в бассейне р. Западная Двина (на территории Беларуси)

Длина реки от истока до устья – 1 020 км (в пределах Беларуси – 328 км). Общая площадь водосбора – 87,9 тыс. км<sup>2</sup> (в пределах Беларуси – 33,2 тыс. км<sup>2</sup>). Бассейн реки формируют 12 тыс. средних и малых рек. Основные притоки: правые – р. Торопа (длина 174 км), р. Оболь (длина 148 км), р. Дрыса (длина 183 км); левые – р. Межа (длина 259 км), р. Каспля (длина 136 км), р. Лучоса (длина 90 км), р. Улла (длина 123 км), р. Дисна (длина 178 км), р. Друйка (длина 52 км).

Густота речной сети составляет 0,51 км/км<sup>2</sup>, насчитывается свыше 1 тыс. рек длиной более 1 км. Озёрами занято 3 % площади водосбора. Особенностью режима является высокое весеннее половодье, низкая летняя межень с частыми дождевыми паводками и устойчивая зимняя межень. На период весеннего половодья приходится 56 % годового стока, на летне-весеннюю и зимнюю межень – 33 и 11 % соответственно [3, 4, 5, 6].

*Климатические условия*

Непосредственное влияние Балтийского моря объясняет климатические особенности бассейна. Климат территории формируется под преобладающим влиянием Атлантического океана, его тепло Северо-Атлантического течения. Бассейн Западной Двины отличается мягким климатом, хорошими условиями увлажнения, умеренной температурой воздуха. Кроме того, чередование воздушных масс различного происхождения создает характерный для бассейна неустойчивый тип погоды [6].

Для бассейна Западной Двины характерна сглаженность температурного режима: внутригодовые амплитуды колебания температуры воздуха здесь в среднем равны 25 °С.

Количество осадков в течение года уменьшается с запада на восток – от 900 мм на побережье до 650 мм в средней части бассейна, увеличение осадков – до 700 мм наблюдается при продвижении от центра бассейна к северу – к Валдайской возвышенности.

Начало зимнего периода в верхней части бассейна приходится на середину ноября, в нижней – на третью декаду месяца, а в самом низовье – на конец ноября. При этом следует отметить, что в западной части бассейна дата осеннего перехода температуры воздуха через 0 °С выражена в большинстве случаев весьма нечетко.

Средняя продолжительность зимнего периода в нижнем участке бассейна составляет 120 дней, в среднем – 130–135, в верхнем – 140 и более дней.

Осенью устойчивый снежный покров в восточной части бассейна появляется чаще всего, начиная с конца ноября, а в западной – со второй половины декабря. Таяние снега весной на западе заканчивается обычно в конце марта, а на востоке – в начале апреля. Продолжительность залегания снежного покрова колеблется в верхней части бассейна в пределах 130–140 дней, в средней – 120–130, в нижней – 70–80 дней.

Зимой часто наблюдаются оттепели различной продолжительности, которые вызывают зимние паводки. Число дней с оттепелями увеличивается от 10 в верховьях реки до 30 в ее нижней части. В отдельные годы продолжительность оттепелей в верхней части бассейна доходит до 30 %, а в нижней части – до 60 % зимнего периода.

Весной и в первой половине лета рост температуры продолжается до июля – самого теплого месяца в году. Затем температура воздуха понижается; при этом понижение температуры осенью происходит медленнее, чем ее повышение весной. Такое явление обусловлено близостью моря, отдающего в осенние месяцы накопленное за лето тепло.

Абсолютные минимумы температуры воздуха имеют значение порядка –30–40 °С (январь); наиболее высокие – порядка +31–+35 °С (июль, август).

В бассейне преобладают ветры юго-западного, западного и северо-западного направлений. В холодный период года преобладают ветры юго-западных и западных направлений. Различные формы рельефа трансформируют этот преобладающий поток. Повторяемость ветров юго-западной направленности горизонта (Ю, ЮЗ, З) составляет 45–50 %. Сравнительно часто (15–20 %) дуют юго-восточные ветры, связанные с юго-западной периферией сибирского антициклона или малоподвижными антициклонами Восточной Европы [3, 4, 5, 6].

Сеть пунктов метеорологических и гидрологических наблюдений, расположенных в белорусской части бассейна р. Западная Двина, представлена на рисунке 1.

*Характеристика водных ресурсов*

Объем стока реки Западная Двина в среднем за многолетний период наблюдений составляет 7,1 км<sup>3</sup>/год на входе в пределы республики (г. Витебск) и увеличивается на границе с Литвой до 13,9 км<sup>3</sup>/год. Среднемноголетний сток, формирующийся в пределах республики, составляет 6,8 км<sup>3</sup>/год. Объем речного стока в р. Западная Двина за многолетний период наблюдений и за 2023 год приведен в таблице 2.

**Таблица 2 – Речной сток Западной Двины в пределах Беларуси за многолетний период и 2023 год [7]**

Створ	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>		Многолетние значения речного стока, км <sup>3</sup> /год			Речной сток 2023 г., км <sup>3</sup> /год
	всего	В пределах Беларуси	среднее	наибольшее	наименьшее	
Витебск	27,3	3,1	7,1	11,9	3,1	9,45
Полоцк	41,7	17,3	9,6	15,8	4,6	14,3
гр. Латвии	61,7	33,2	14,2	23,4	6,8	20,1

За водным режимом рек бассейна р. Западная Двина в пределах республики ведутся стационарные наблюдения на 21 гидрометрическом посту, из них 5 расположено на самой р. Западная Двина, 5 – на водоёмах. Гидрометрический пост в г. Витебске, открытый в 1877 г., имеет наиболее длительный период наблюдений за речным стоком в этом бассейне с 1877 по 2021 гг., т. е. 145 лет. На предварительном этапе проведен статистический анализ, восстановлены пропущенные данные с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [8]. Для исследования влияния современного потепления климата выполнен сравнительный анализ двух интервалов: 1877–1986 гг. до начала потепления и 1987–2021 гг. собственно период потепления. Кроме того, отдельно анализировались ряды наблюдений за последние 50 лет (1972–2021 гг.), т. е. расчетный период, рекомендуемый для определения статистических гидрологических характеристик.

Естественный режим стока претерпел некоторые (в основном не существенные) изменения только на небольших реках, в бассейнах которых проводятся мелиоративные работы, регулирование речных русел, созданы шлюзы, плотины и водохранилища различного хозяйственного назначения. Так, например, отмечается некоторое искажение естественного гидрологического режима рек в следующих

створах: р. Кривинка – н. п. Добригоры (с 1965 г.), р. Эсса – н. п. Гадивля (с 1963 г.), р. Усса – н. п. Казиново (с 1963 г.), р. Уша – н. п. Толкачи (с 1967 г.), р. Березовка – н. п. Сатуки (с 1962 г.), р. Нища – н. п. Соколище (с 1959 г.) [6].

В речной сети р. Западная Двина как по количеству, так и по суммарной длине, преобладают малые водотоки, в водосборах которых формируется основная часть местного речного стока.

Исходными данными послужили материалы наблюдений Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (Минприроды) за различными видами стока по действующим гидрологическим постам Беларуси за период инструментальных наблюдений по 2021 год включительно, опубликованные в государственных кадастрах. В исследованиях по оценке изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. и его прогнозу на период до 2035 года использованы данные по девяти постам с наиболее продолжительными и непрерывными периодами наблюдений за стоком и при условии наличия данных за указанный период (таблица 3) [6].

**Таблица 3** – Перечень гидрологических постов, которые используются для оценки и прогноза изменения поверхностного стока

Номер на (рисунке 1)	Наименование поста (река – населенный пункт)
1	Двина – Витебск
2	Двина – Полоцк
3	Оболь – Оболь
4	Полота – Янково
5	Нача – Нача
6	Дисна – Шарковщина
7	Березовка – Саутки
8	Дриса – Дерновичи
9	Ницца – Соколище

Исследование внутренней структуры временных рядов может выполняться различными методами: построением разностных интегральных кривых, корреляционных, автокорреляционных и спектральных функций, использованием спектрально-временного анализа, причем каждый из них имеет свои преимущества и недостатки [9].

Тенденции или систематические изменения в стоке, связанные с антропогенными факторами, проявляются медленно и постепенно, что затрудняет их выявление. Лишь в отдельных случаях при слабом антропогенном влиянии тенденции прослеживаются уже при графическом анализе однородности данных наблюдений по методу аналогии.

Объективное выявление антропогенных тенденций возможно при соблюдении условия репрезентативности ряда, которая оценивается по реке-аналогу с учетом анализа четного числа периодов разной водности. После этого анализа тенденция определяется аналитически.

С достаточной для практических расчетов точностью можно использовать линейные тренды:

$$Q(t) = Q(0) \pm \Delta Q \cdot t, \quad (1)$$

где  $Q(t)$  – расход воды в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с;  $Q(0)$  – величина расходов воды на начало расчетного периода, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta Q$  – скорость изменения расходов воды, м<sup>3</sup>/с/год;  $t$  – календарный год.

В отдельных случаях использовались и более сложные виды трендов.

#### Методика прогнозирования климата

Для прогнозов изменения климата должны использоваться как глобальные, так и региональные климатические модели, которые основаны на описании процессов в динамике и базируются на численном решении систем уравнений в частных производных математической физики. Кроме того, необходимость использования климатических моделей для прогноза метеорологических показателей вместо статистических методов обработки метеорологических данных обусловлена многообразием как природных, так и антропогенных факторов – как в целом на планете, так и в регионе, которые оказывают и потенциально могут оказывать влияние на изменение климата [10, 11].

Исследования по оценке и прогнозу изменения климата для территории Беларуси, выполненные с учетом обязательств Республики Беларусь по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата, описаны нами в работе [10]. Остановимся на некоторых вопросах прогнозирования климата на территории Беларуси.

Согласно Четвертому национальному сообщению в соответствии с обязательствами Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2006 г.) отмечается снижение водности в бассейнах рек в период с 1988 г. с уменьшением стока от 4 до 13 % [12]. Характерным для рассматриваемого периода является изменение распределения среднемесячного стока внутри года, в первую очередь это касается зимних и весенних месяцев, когда заметно увеличиваются месячные расходы в реках на всей территории страны – на 30–90 % в январе – марте. Увеличение зимнего стока связано с увеличением частоты оттепелей и прохождением зимних паводков. В апреле и мае сток резко уменьшается. В Сообщении приведено общее заключение о снижении максимального стока рек бассейна Западной Двины.

В Пятом национальном сообщении Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2009 г.) используется модель LEAP [13].

В Сообщении приводится заключение, что «изменение климата приведет к увеличению изменчивости стока, увеличению повторяемости экстремальных явлений (засух, интенсивных паводков)».

В Беларуси исследования по изучению климата также проводятся и в рамках проекта трансграничного сотрудничества TACIS SKPI «Оказание поддержки в реализации Киотского протокола в странах СНГ» [14]. В рамках этого проекта используются модели – ECHAM5, модель Института Макса Планка атмосферной циркуляции и модель CSIRO Mk3 биопродуктивности.

Выполненные исследования позволили сделать ряд обобщений:

- ожидается увеличение количества дней с положительными температурами в конце зимы;
- разница между 1990 годом и нынешним климатом составила +1,2 °С;
- на более ранние периоды сместится дата устойчивого перехода температуры через 0 °С;
- продолжится рост осадков в зимние месяцы и сокращение осадков в ранневесенние месяцы, особенно на юге страны.

Согласно этому сценарию в XXI веке средняя температура приземного воздуха в целом по территории Беларуси будет продолжаться повышаться, в первую очередь за счет повышения минимальных температур. Перечисленные тенденции, как и многие другие особенности изменяющегося климата, окажут существенные воздействия на условия жизни граждан и экономическую деятельность. Последствия быстрой изменчивости климатических условий будут проявляться в росте повторяемости опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных резких изменений погоды, которые приводят к социально-экономическому ущербу, непосредственно влияют на эффективность деятельности таких жизненно важных отраслей экономики, как сельскохозяйственное производство, лесное хозяйство, энергетика, транспорт, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство, а также на здоровье людей [15].

На основании анализа данных Республиканского гидрометеорологического центра (РГМЦ) его сотрудниками были получены следующие результаты.

В Беларуси на конец XX и начало XXI века пришелся самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений за температурой воздуха на протяжении последних почти 130 лет. Особенность этого потепления не только в небывалой его продолжительности, но и в более высокой температуре воздуха, которая в среднем за двадцать лет (1989–2009 гг.) превысила климатическую норму на 1,1 °С. Из двадцати самых теплых лет, начиная с послевоенного периода (1945 года), шестнадцать лет приходится на период 1989–2010 годы.

Повышение температурного режима произошло практически в каждом месяце. Рост температуры воздуха наиболее значителен в зимние и первые весенние месяцы. Намечается тенденция увеличения продолжительности безморозкового периода. Майские заморозки различной интенсивности наблюдаются ежегодно, и они наиболее опасны, особенно для теплолюбивых культур. Опасность осенних заморозков не столь значительна, так как увеличение температуры воздуха в весенние и летние месяцы определяет ускоренное созревание сельскохозяйственных культур.

Повышенные температуры первых весенних месяцев приводят к более раннему сходу снежного покрова и переходу температуры воздуха через 0 °С в сторону повышения. В среднем за рассматриваемый период этот переход происходил на 10–15 дней раньше средних многолетних значений. Продолжительность периода со снежным покровом в Республике Беларусь сократилась на 10–15 дней, а глубина промерзания уменьшилась на 6–10 см. На декаду раньше начинается вегетационный период.

В научно-методическом контексте всестороннее изучение изменения климата и его последствий для экономики Беларуси проведено академиком В. Ф. Логиновым [16]. В его работах проводится сравнительный анализ различных моделей циркуляции атмосферы и океана (МОЦА). По его данным, наилучшим образом моделирует данные базового периода модель HadCM2 (Великобритания) и учитывает совместное увеличение парниковых газов и сульфатных аэрозолей. Несколько худшие результаты сравнения показывают модели CSIRO Mk2 (Австралия) и CGCM1 (Канада).

Прогнозные данные с использованием модели HadCM2 на период 2010–2039 гг. показывают увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1 °С, при этом среднегодовая дневная температура повышается на 0,92 °С, а ночная – на 1,15 °С. Приращения сумм

температур выше 0, 5 и 10 °С ожидаются примерно одинаковыми и составляют приблизительно 200–220 °С, приращение сумм для 15 °С значительно выше.

Существующие оценки изменений климата для территории Беларуси не противоречат концепции глобального потепления климата. В последние десятилетия намечается четко выраженная тенденция потепления, особенно в зимние и весенние месяцы (I–IV). Наконец XX – начало XXI века приходится самый продолжительный период потепления за весь более чем 120-летний период систематических инструментальных наблюдений в Беларуси.

Следует отметить, что приведенные результаты исследований и оценок, выполненных в Беларуси, носят наиболее общий и приближенный характер. В разрезе речных бассейнов оценка воздействия глобального изменения климата на водные ресурсы в Беларуси исследована недостаточно. Можно отметить лишь отдельные работы [17, 18, 6, 19].

*Методология оценки воздействия изменения климата на сток рек*

Для прогнозных оценок изменения стока рек бассейнов адаптирован метод гидролого-климатических расчетов (ГКР), предложенный В. С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [20]. Положив в основу гидролого-климатическую гипотезу В. С. Мезенцева [20], разработана многофакторная модель, включающая стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом разрезе. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек в зависимости от тех или иных гипотез климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов.

Уравнение водного баланса речного водосбора за некоторый промежуток времени имеет вид:

$$H(I) = E(I) + Y_k(I) \pm \Delta W(I), \quad (2)$$

где  $H(I)$  – суммарные ресурсы увлажнения, мм;  $E(I)$  – суммарное испарение, мм;  $Y_k(I)$  – суммарный климатический сток, мм;  $\Delta W(I)$  – изменение влагозапасов деятельного слоя почвогрунтов, мм;  $I$  – интервал осреднения.

Суммарное испарение находится по формуле

$$E(I) = E_m(I) \left[ 1 + \left( \frac{\frac{E_m(I)}{W_{\text{НВ}}} + V(I)^{1-r(I)}}{KX(I) + g(I) + V(I)} \right)^{\frac{1}{n(I)}} \right], \quad (3)$$

где  $E_m(I)$  – максимально возможное суммарное испарение, мм;  $W_{\text{НВ}}$  – наименьшая влагоемкость почвы, мм;  $V(I) = W(I) / W_{\text{НВ}}$  – относительная влажность почвогрунтов на начало расчетного периода;  $KX(I)$  – сумма измеренных атмосферных осадков, мм;  $g(I)$  – грунтовая составляющая водного баланса, мм;  $r(I)$  – параметр, зависящий от водно-физических свойств и механического состава почвогрунтов;  $n(I)$  – параметр, учитывающий физико-географические условия стока.

Относительная влажность почвы на конец расчетного периода определяется из соотношений

$$V(I+1) = V(I) \cdot \left( \frac{V_{\text{сп}}(I)}{V(I)} \right)^{r(I)}; \quad (4)$$

$$V_{\text{сп}}(I) = \left( \frac{KX(I) + g(I) + V(I)}{\frac{E_m(I)}{W_{\text{НВ}}} + V(I)^{1-r(I)}} \right)^{\frac{1}{r(I)}}. \quad (5)$$

Полученные значения  $V_{\text{сп}}(I)$  сравнивают с относительной величиной полной влагоемкости  $V_{\text{пв}}$ . Если  $V_{\text{сп}}(I) \leq V_{\text{пв}}$ , то принимается расчетное значение относительной средней влажности, в противном случае, когда  $V_{\text{сп}}(I) \geq V_{\text{пв}}$  к расчету принимается  $V_{\text{сп}}(I) = V_{\text{пв}}$ , разница  $(V_{\text{сп}}(I) - V_{\text{пв}}) \cdot W_{\text{НВ}}$  относится к поверхностному стоку.

Величина атмосферных осадков в месяцы холодного периода за вычетом величины суммарного испарения переносится на период половодья, т. е. на март месяц.

Максимально возможное суммарное испарение определялось по методике, описанной в работе [21, 22].

Суммарные ресурсы увлажнения определяются следующим образом:

$$H(I) = KX(I) + W_{\text{НВ}}(V(I) - V(I+1)). \quad (6)$$

Решение системы уравнений (2) – (6) осуществляется методом итераций до тех пор, пока значение относительной влажности почвогрунтов на начало расчетного интервала не будет равно значению относительной влажности на конец последнего интервала. При расчете начальное значение влажности принимается равным значению наименьшей влагоемкости, т. е.  $W(1) = W_{\text{НВ}}$ , откуда  $V(1) = 1$ . Сходимость решения метода ГКР достигается уже на четвертом шаге расчета.

Корректировка климатического стока осуществляется с помощью коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов на формирование руслового стока, т. е.

$$Y_p(I) = k(I) \cdot Y_k(I), \quad (7)$$

где  $Y_p(I)$  – суммарный русловой сток, мм;  $k(I)$  – коэффициент, учитывающий гидрографические характеристики водосбора.

Моделирование водного баланса исследуемой реки реализовано нами в виде компьютерной программы и осуществляется в два этапа. На первом этапе производится настройка модели по известным составляющим водного и теплового балансов исследуемой реки. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего соответствия рассчитанного климатического и руслового стоков. Первый этап заканчивается построением графиков климатического и руслового стока и выводом ошибки моделирования.

Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного стока свидетельствует о корректности модели. Полученные параметры модели используются при проведении численного эксперимента.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки, используя параметры, полученные при калибровке модели. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора [23].

Результаты моделирования свидетельствуют о высокой точности расчета водного баланса как для практического применения, так и для теоретических исследований, что проверено на большом количестве рек Беларуси с площадью водосбора около 1000 км<sup>2</sup>, на которых ведутся гидрометрические наблюдения. Таким образом, при наличии данных об атмосферных осадках, температуре воздуха, дефицитах влажности воздуха на расчетный период и современные значения стока воды реки, а также гидрографических характеристик водосбора, с помощью приведенной методики возможно получить прогнозные оценки водного баланса малых рек Беларуси на расчетную перспективу.

Решение уравнения водного баланса для водосбора связано с определением среднего значения тех элементов, наблюдения за которыми ведутся в отдельных точках водосбора. Поэтому одной из главных составляющих моделирования водного режима является корректная оценка климатических характеристик и их осреднение по водосбору. Подробно эта задача рассмотрена в работе [24].

При настройке моделей по предлагаемой методике возникли проблемы с определением параметров для зимних месяцев. Дело в том, что модель недостаточно точно учитывала участвовавшие в последнее время оттепели. Поэтому проведена корректировка модели, учитывающая оттепели. Полученная при настройке модели разница между русловым и климатическим стоком относилась к стоку, сформировавшемуся во время оттепелей, которая фиксировалась в настройках модели. При прогнозировании стока будущего эта составляющая добавлялась непосредственно к стоку, а ее величина отнималась от атмосферных осадков соответствующего месяца и на период половодья переносилась осадки за вычетом суммарного испарения и стока в период оттепелей. Причем величина стока в период оттепелей корректировалась с учетом прогнозируемой температуры соответствующего месяца. В первом приближении величину этого стока можно принять из соотношения месячных температур воздуха и величины стока, в период оттепелей полученной при настройке модели.

Прогнозные оценки изменения стока рек осуществлялись по следующей схеме. Настраивалась модель по средним многолетним данным по речному стоку, атмосферным осадкам, температуре воздуха и дефицитам влажности воздуха. Затем вводились прогнозные величины для соответствующей перспективы по тем метеостанциям, которые были использованы при настройке модели. Считывались параметры настройки модели, и осуществлялась прогнозная оценка. Полученные значения климатического стока сравнивались между собой по соотношению  $\Delta_{кл.} = Y_{кл.}^{пр.} / Y_{кл.}^{cos.} \cdot 100\%$ . Непосредственная прогнозная оценка руслового стока находилась из соотношения  $Q^{пр.} = Q^{cos.} \cdot \Delta_{кл.} \cdot 100, м^3 / с.$

Пример моделирования среднегогодового годового стока и его внутригодового распределения (калибровка модели и прогноз) для р. Дисна – Шарковщина представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Измеренный и рассчитанный сток р. Дисны в створе Шарковщины

**Полученные результаты и их обсуждение**

*Анализ многолетних колебаний годового стока  
Годовой сток*

В ходе исследований проведен статистический анализ многолетних колебаний годового стока р. Западная Двина в створе г. Витебска за период 1877–2021 гг. с целью выявления квазипериодичности и тренда.

Хронологический ход среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска представлен на рисунке 3.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 4.

Статистически значимых различий в средних величинах расходов воды за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. не установлено. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет  $t_{кр} = 1,67$ , в то время как  $t$ -статистика = 1,17. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции. Полученные результаты хорошо согласуются с полученными нами ранее результатами [26, 27].

*Уточнение водных ресурсов бассейна Западной Двины в Беларуси*

В течение последних лет водные ресурсы страны были подвержены трансформации в силу воздействия естественных и антропогенных факторов на сток. Уточненные поверхностные водные ресурсы бассейна Западной Двины за период с 1956 по 2015 гг. и данные о трансформации стока на исследуемом 60-летнем интервале по отношению к периоду инструментальных наблюдений до 1996 г. по бассейну Западной Двины приведены в таблице 5.

Суммарные поверхностные ресурсы бассейна Западной Двины практически не изменились. В то же время произошло перераспределение естественных водных ресурсов по бассейнам отдельных рек. Имеет место незначительный рост водности Западной Двины за последние годы.

Для рек бассейна Западной Двины характерно незначительное увеличение значений стока. Изменения объемов стока рек и гидрологического режима в современных условиях вызваны усилением интенсивности общей циркуляции атмосферы.

*Весенние половодья*

В ходе исследований проведен статистический анализ многолетних колебаний максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за период 1877–2021 гг. с целью выявления квазипериодичности и тренда.

Хронологический ход максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска представлен на рисунке 4.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблице 6.

Статистически значимо различие в максимальных расходах воды весеннего половодья за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет  $t_{кр} = 1,67$ , в то время как  $t$ -статистика = 4,85. Существенных различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенны изменений в коэффициентах асимметрии не произошло. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции.

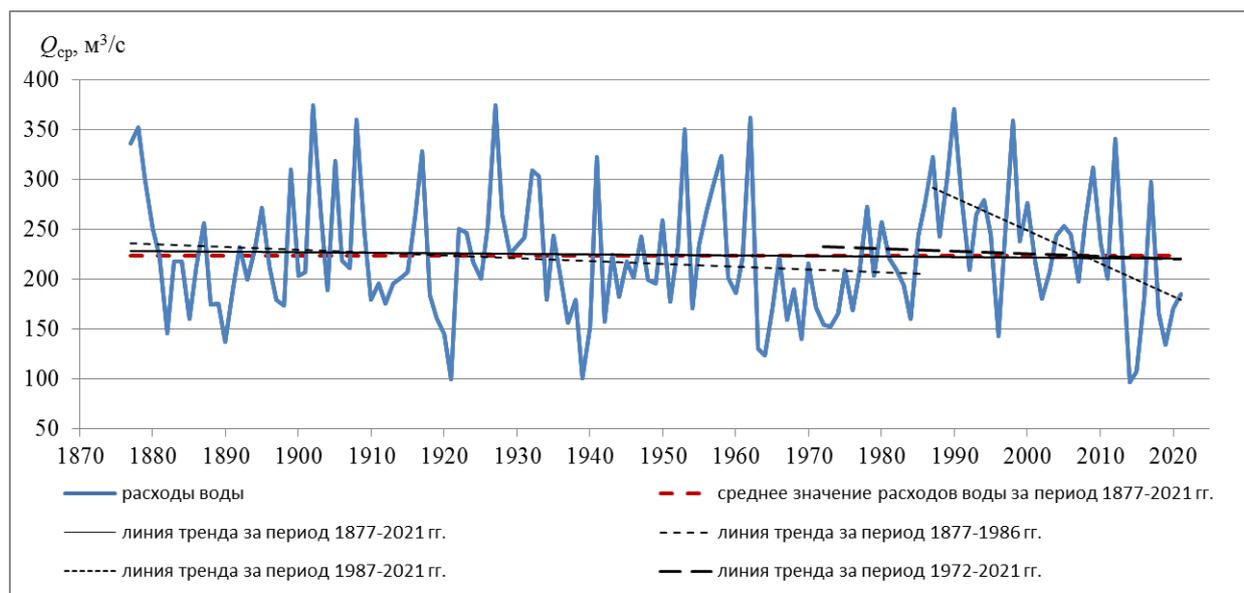


Рисунок 3 – Хронологический ход среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска  
Примечание – Легенда на рисунках 4–6 соответствует легенде, представленной на рисунке 3.

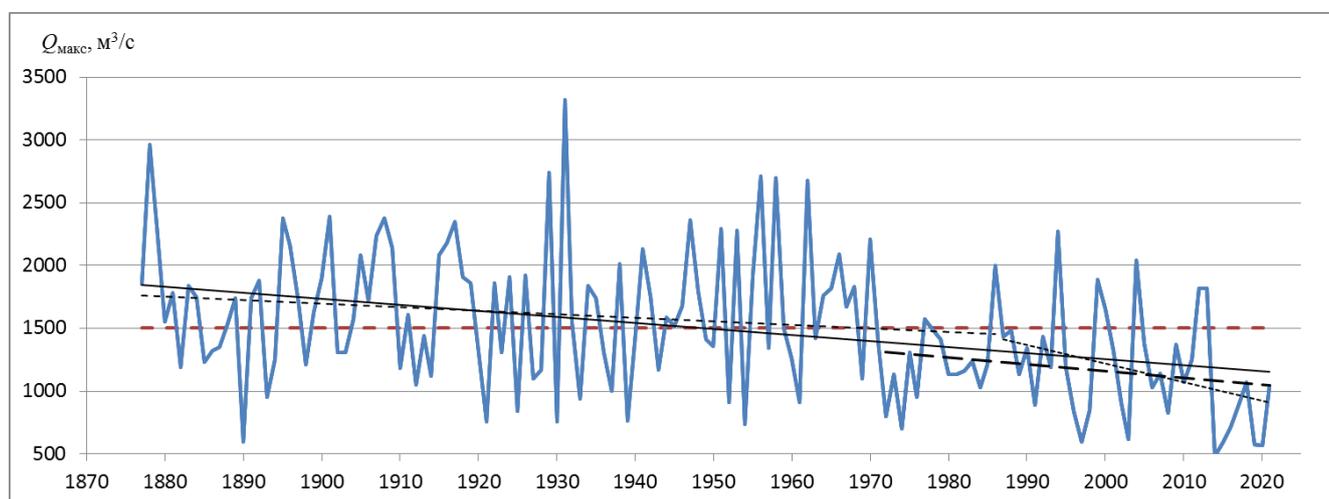
**Таблица 4** – Основные статистические характеристики среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, гг.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{ср}$ , м <sup>3</sup> /с	224	221	236	227
$C_v$	0,28	0,27	0,28	0,27
$C_s$	0,49	0,69	-0,04	0,21
$r(1)$	0,28	0,24	0,34	0,38
$\Delta Q$ 10, м <sup>3</sup> /с	-0,54	-2,75	-32,9	-2,54
$r$	-0,04	-0,15	<b>-0,51</b>	-0,06
$r_{кр, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{ср}$	-0,24	-1,25	-13,96	-1,12

Примечание:  $Q_{ср}$  – среднемноголетнее значение годовых расходов воды;  $C_v$  – коэффициент вариации;  $C_s$  – коэффициент асимметрии;  $r(1)$  – коэффициент автокорреляции;  $\Delta Q$  10 – градиент изменения расходов воды за 10 лет;  $r$  – коэффициент корреляции модели (1);  $r_{кр, p=5\%}$  – критические значения коэффициента корреляции [25]; % от  $Q_{ср}$  – процентные изменения расходов воды за 10 лет к среднемноголетнему значению годовых расходов воды. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

**Таблица 5** – Естественные ресурсы бассейна Западной Двины и Беларуси в целом в 1956–2015 гг. (числитель) и изменение стока по отношению к периоду до 1996 г. (знаменатель)

Речной бассейн	Речной сток, км <sup>3</sup> /год									
	местный					общий				
	Обеспеченность, %					Обеспеченность, %				
	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95
Западная Двина	<u>10,6</u> 0,1	<u>7,8</u> 0,1	<u>6,9</u> 0,1	<u>5,5</u> 0,0	<u>4,4</u> 0,1	<u>22,3</u> 0,4	<u>16,4</u> 0,2	<u>14,1</u> 0,2	<u>11,6</u> 0,3	<u>9,0</u> 0,4
<b>В целом по Беларуси</b>	<b><u>51,8</u></b> <b>0,3</b>	<b><u>37,9</u></b> <b>0,4</b>	<b><u>34,1</u></b> <b>0,1</b>	<b><u>28,1</u></b> <b>-0,2</b>	<b><u>22,7</u></b> <b>-0,1</b>	<b><u>88,2</u></b> <b>1,1</b>	<b><u>64,3</u></b> <b>0,9</b>	<b><u>56,9</u></b> <b>0,7</b>	<b><u>46,4</u></b> <b>0,2</b>	<b><u>37,5</u></b> <b>1,2</b>



**Рисунок 4** – Хронологический ход максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска

**Таблица 6** – Основные статистические характеристики максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, гг.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{ср}$ , м <sup>3</sup> /с	1501	1608	1162	1179
$C_v$	0,37	0,33	0,39	0,35
$C_s$	0,52	0,52	0,57	0,55
$r(1)$	0,11	-0,06	0,23	0,22
$\Delta Q$ 10, м <sup>3</sup> /с	-48,31	-28,52	-146,88	-55,04
$r$	<b>-0,37</b>	-0,17	<b>-0,33</b>	-0,19
$r_{кр, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{ср}$	-3,22	-1,77	-12,64	-4,67

Водный режим р. Западная Двина в общем отличается от режима средних и малых рек. Гидрограф весеннего половодья р. Западная Двина характеризуется значительной крутизной как на подъеме, так и на спаде, и лишь в некоторые годы при замедленном и прерывистом снеготаянии весеннее половодье состоит из нескольких волн. Высота весеннего подъема в среднем 6–7 м, а в годы с высоким половодьем уровень может повышаться до 9–12 м над предподъемным.

Для каждого бассейна характерна своя форма гидрографа весеннего половодья в связи с различными природными факторами (рельеф и конфигурация, залесенность и заболоченность территории бассейна). На малых реках половодье проходит несколькими волнами, на больших – носит ступенчатый характер при затяжном таянии снега; при быстром снеготаянии половодье проходит одной волной с резким интенсивным подъемом и более плавным спадом. Однако в годы с весьма недружным развитием весенних процессов при замедленном и прерывистом снеготаянии весеннее половодье проходит несколькими волнами.

На снижение максимума и увеличение продолжительности половодья оказывает влияние лес (степень залесенности, характер размещения) и болота, сток с которых замедлен в связи с малыми уклонами. Половодье, в зависимости от величины реки, продолжается 30–120 суток, ширина разливов во время половодья колеблется от 0,1–0,2 до 1–2 км, глубина затоплений – от 1–1,5 до 2–2,5 м, их длительность – 7–10 суток [28]. Спад весеннего половодья продолжается в среднем 30–40 дней, а на реках с заболоченными и значительно залесенными водосборами несколько дольше – до 60 дней.

Относительно регулярные наблюдения за гидрологическими параметрами стока рек начаты в конце XIX в. Однако несистематизированные сведения об уровнях и расходах в ранний период в силу отсутствия высотной привязки не используются в практике гидрологических расчетов обеспеченных величин. Гидрологические характеристики половодий для р. Западная Двина, полученные на основании обработки однородных рядов наблюдений речного стока, приведены в таблице 7 [28].

Характеристика наводнений на реках бассейна Западной Двины в целом для рек бассейна Западной Двины на Беларуси природной генетической основой формирования наводнений являются факторы половодий, такие как степень осеннего увлажнения почвы, дата наступления зимнего периода, высота снежного покрова, дружность весны, отсутствие резких колебаний температуры и заморозков, промерзание почвы.

В таблице 8 представлены наиболее значительные наводнения на реках бассейна Западной Двины, вызванные весенним половодьем за период инструментальных наблюдений [29].

За последнее время опасные высокие уровни воды на реках бассейна Западной Двины наблюдались в 2010, 2011, 2012, 2013, 2018, 2021 годах, максимальные из них приведены в таблице 9. Как видно из таблицы 9, максимальные опасные уровни наблюдались в 2010 и в 2013 годах. В формировании половодья 2010 года особую роль сыграли большие снеготопы (больше нормы на 20–100 %), толщина ледяного покрова была больше нормы на 3–10 см.

Таблица 7 – Гидрологические характеристики половодий для Западной Двины

Створ	Уровни весеннего половодья, см над "0" графика			Отметка выхода воды на пойму, см над "0" графика
	1 %	25 %	50 %	
г. Полоцк	1409	1060	933	1195
г. Верхнедвинск	1420	1062	898	950

Таблица 8 – Годы с наводнениями в период весенних половодий

Река-пост	Характеристика наводнения		
	катастрофическое $P < 1 \%$	выдающееся $P = 1-2 \%$	большое $P = 3-10 \%$
Западная Двина – г. п. Сураж		1929, 1931, 1956	1878, 1895, 1901, 1908, 1915, 1917, 1958, 1962
Западная Двина – г. Витебск	1931	1878, 1929, 1956	1958, 1962
Западная Двина – г. п. Улла	1931	1941, 1951, 1956	
Западная Двина – г. Полоцк	1931	1951, 1956	1941, 1953, 1958, 1962
Западная Двина – г. Верхнедвинск	1931	1956	1958, 1962
Оболь – г. п. Оболь		1956	1938, 1951, 1953, 1955, 1958, 1962, 1965
Дисна – г. п. Шарковщина	1931	1951	1953, 1956, 1958

Таблица 9 – Опасные уровни воды весеннего половодья за период 2010–2021 гг. на водосборе Западной Двины

Река – пост	Отметка «0» поста, м БС	Опасный высокий уровень над нулем поста, см	Уровень воды над нулем поста, см	
			максимальный и дата наблюдений	при затоплении и дата наблюдений
Западная Двина – Полоцк	106,14	1050	1097 22.04.2013	1065 5.04.2010
Западная Двина – Верхнедвинск	99,38	840	1098 23.04.2013	911 17.04.2013
Улла – Бочейково	119,52	650	672 30 31.03.2010	655 29.03.2010
Дисна – Шарковщина	116,52	600	778 21.04.2013	680 18.04.2013

Изменения максимальных расходов воды весеннего половодья и их причины

В последнее время большую роль в увеличении частоты и разрушительных наводнений помимо природных факторов играют антропогенные воздействия. Среди них в первую очередь следует назвать сведение лесов (максимальный поверхностный сток возрастает на 250–300 %), освоение поймы, нерациональное ведение сельского хозяйства и др. Существенное уменьшение максимального, увеличение минимального зимнего и минимального летне-осеннего стока связано как с природными факторами, так и с освоением пойм, служащих природными регуляторами стока.

Наибольший расход воды р. Западная Двина у г. Витебска наблюдался в 1931 г. и составил 3320 м<sup>3</sup>/с, что соответствует обеспеченности  $P = 0,7 \%$ . С середины 60-х гг. прошлого столетия максимальный сток имеет тенденцию к снижению, что подтверждает проверка на статистическую значимость средних величин за различные периоды. Так, статистически различимыми на 5%-ом уровне значимости являются средние за период с 1877 по 1965 гг. ( $\bar{Q} = 1670 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и с 1966 по 2021 гг. ( $\bar{Q} = 1440 \text{ м}^3/\text{с}$ ), а также средние за период с 1877 по 1986 гг. ( $\bar{Q} = 1610 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и с 1986 по 2021 гг. ( $\bar{Q} = 1160 \text{ м}^3/\text{с}$ ). В текущем столетии расходы воды весеннего половодья превышали норму в 2000 г. ( $Q = 1650 \text{ м}^3/\text{с}$ ), в 2004 г. ( $Q = 2040 \text{ м}^3/\text{с}$ ), в 2012 г. и 2013 г. ( $Q = 1820 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

печенности  $P = 0,7 \%$ . С середины 60-х гг. прошлого столетия максимальный сток имеет тенденцию к снижению, что подтверждает проверка на статистическую значимость средних величин за различные периоды. Так, статистически различимыми на 5%-ом уровне значимости являются средние за период с 1877 по 1965 гг. ( $\bar{Q} = 1670 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и с 1966 по 2021 гг. ( $\bar{Q} = 1440 \text{ м}^3/\text{с}$ ), а также средние за период с 1877 по 1986 гг. ( $\bar{Q} = 1610 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и с 1986 по 2021 гг. ( $\bar{Q} = 1160 \text{ м}^3/\text{с}$ ). В текущем столетии расходы воды весеннего половодья превышали норму в 2000 г. ( $Q = 1650 \text{ м}^3/\text{с}$ ), в 2004 г. ( $Q = 2040 \text{ м}^3/\text{с}$ ), в 2012 г. и 2013 г. ( $Q = 1820 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Таким образом, на всех реках бассейна Западной Двины имеет тенденция к снижению стока весеннего половодья, независимо от их географического положения, что подтверждают уравнения линии тренда (таблица 6).

По результатам проверки на значимость выявлено, что для всех рек коэффициенты корреляции являются статистически значимыми.

Устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) временных рядов максимальных расходов воды весеннего половодья оценивалась для четырех периодов (таблица 6).

Анализ средних максимальных расходов воды весеннего половодья для рассматриваемых периодов показывает, что произошли существенные уменьшения максимального стока. Это обусловлено в первую очередь многолетними климатическими процессами, выраженными увеличением числа и продолжительностью оттепелей в зимний период. Что касается размаха колебаний, то, судя по коэффициентам автокорреляции, отвергать нулевую гипотезу нет оснований и различия в их значениях следует признать не существенными.

**Таблица 10** – Обеспеченные величины максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные периоды, м<sup>3</sup>/с

Период	Обеспеченность, %			
	1	5	10	50
1877–2021	3060	2530	2260	1510
1877–1965	3170	2680	2430	1670
1966–2021	2520	2080	1860	1240
Изменения, %	-20,5	-22,4	-23,5	-25,7

Как показал анализ таблицы 10, имеет место существенные расхождения в обеспеченных величинах за рассматриваемые периоды. Это означает, что при разработке вероятностных прогнозов необходимо учитывать факт неоднородности временных рядов максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна р. Западная Двина.

Анализ пространственной структуры изменения максимальных расходов воды весеннего половодья позволяет утверждать, что практически на всем бассейне р. Западная Двина произошло изменение стока весеннего половодья в сторону уменьшения.

Масштабы гидромелиоративных работ в бассейне р. Западная Двина значительно меньше, чем в бассейне р. Припять, тем не менее, падение максимальных расходов воды весеннего половодья на этих реках согласовано. Можно предположить, что основная причина, вызвавшая уменьшение максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна р. Западная Двина, носит природный характер и в меньшей степени связана с антропогенными воздействиями [6].

Анализ многолетнего хода максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна Западной Двины показал, что на всех реках наблюдается тенденция к снижению стока весеннего половодья, особенно явно выраженная с середины 60-х годов прошлого столетия. Для количественной оценки этих трансформаций построены линии трендов для различных периодов осреднения (таблица 6).

**Минимальный сток**

Летне-осенняя межень обычно наступает в конце мая – середине июня и заканчивается в октябре. В некоторые годы при дружном прохождении весеннего половодья период низкого стока на реках бассейна Западной Двины начинается в конце апреля – начале мая, а в годы затяжного половодья или когда на его спаде идут дожди – в конце июня – начале июля. Средняя продолжительность летне-осенней межени на малых и средних реках до 140–165 суток, до 96 суток на р. Западная Двина в створе г. Витебска. Почти каждый год межень прерывается значительными дождевыми паводками и складывается из двух, в отдельные годы из III–IV четырех периодов. Наиболее прерывистой меженью характеризуются реки Витебской возвышенностей. Относительно устойчивая межень в бассейне р. Западная Двина. Сток летне-осенней межени на малых и средних реках составляет 5–20 %, на самой р. Западная Двина – 7–12 % годового. Величина среднего слоя стока межени на малых и средних реках колеблется от 3 до 50 мм. Наибольшая величина слоя стока (25–50 мм) наблюдается на возвышенностях, наименьшая (около 3 – 15 мм) на низинах. Наиболее маловодный

Заметное снижение максимальных расходов воды весеннего половодья в конце XX века вызвано увеличением количества оттепелей зимой, во время которых значительные снежные запасы трансформируются в сток зимней межени. Это вызывает увеличение зимнего стока, а порой приводит к зимним паводкам и снижает максимальные расходы весной.

Для подтверждения данной гипотезы приведен многолетний ход расходов минимального зимнего стока, который имеет тенденцию к увеличению, что подтверждается положительным линейным трендом.

По результатам проверки на значимость линейных трендов выявлено, что для р. Западная Двина в створе г. Витебска их коэффициенты корреляции являются статистически значимыми на 5 %-ом уровне для периодов – 1877–2021 гг. и 1987–2021 гг.

В связи с наличием тенденций уменьшения стока выполнен сравнительный анализ изменения обеспеченных величин максимальных расходов воды весеннего половодья за периоды: 1877–1965 гг. и 1966–2021 гг. Используя распределение Пирсона III типа получены обеспеченные величины стока для рассматриваемых периодов (таблица 10).

период преимущественно в июле – августе. Особенно низкие уровни наблюдаются в период засухи. Продолжительность маловодного периода на малых и средних реках 5–30 суток.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 11.

Статистически значимых различий в минимальных летне-осенних расходах воды за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. не установлено. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет  $t_{кр} = 1,67$ , в то время как  $t$ -статистика = 0,47. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции. Полученные результаты хорошо согласуются с полученными нами ранее результатами [30].

Зимняя межень обычно устанавливается в конце ноября – середине декабря. Наиболее ранние даты наступления межени попадают на конец октября – начало ноября, наиболее поздние – на январь, заканчивается зимняя межень обычно в марте, крайние сроки межени – февраль – апрель. В отдельные годы межень прерывается зимними паводками от оттепелей и складывается из II–IV периодов. Наиболее устойчивая зимняя межень в Беларуси наблюдается на реках бассейна Западной Двины. Сток зимней межени составляет 5–15 % годового стока (от 3 до 45 мм годового стока). Наиболее маловодный период зимней межени преимущественно в феврале и марте. Продолжительность его на малых и средних реках до 60 суток, на р. Западная Двина – до 70 суток. В наиболее маловодные периоды на отдельных малых реках возможно отсутствие стока как летом (пересыхание рек), так и зимой (перемерзание рек). В период межени местами возникает дефицит воды для использования в промышленности, сельском хозяйстве (особенно для обеспечения мелиоративных систем при двухстороннем регулировании водного режима) и коммунальном хозяйстве. Низкие уровни, уменьшение глубин в реках усложняют речное судоходство и лесосплав. Для предупреждения этого, а также для рационализации использования водных ресурсов проводится перераспределение речного стока, строятся водохранилища. Уровни и расходы воды в реках в период межени сперва определяются при помощи гидрологических прогнозов, что позволяет планировать мероприятия по предотвращению нехватки воды.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 12.

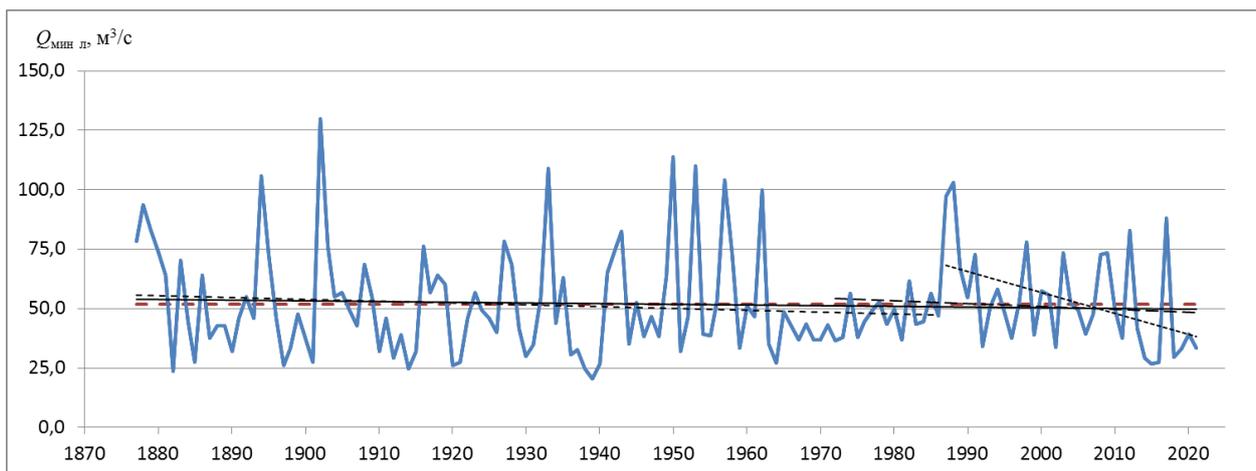


Рисунок 5 – Хронологический ход минимальных летне-осенних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска

Таблица 11 – Основные статистические характеристики минимальных летне-осенних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебск за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, г.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	51,9	51,4	53,3	51,3
$C_v$	0,41	0,42	0,38	0,35
$C_s$	1,22	1,36	0,76	1,07
$r(1)$	0,16	0,17	0,18	0,14
$\Delta Q_{10}, \text{м}^3/\text{с}$	-0,31	-0,76	-8,86	-1,17
$r$	-0,06	-0,11	<b>-0,44</b>	-0,10
$r_{\text{кр}, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{\text{ср}}$	-0,60	-1,48	-16,62	-2,28

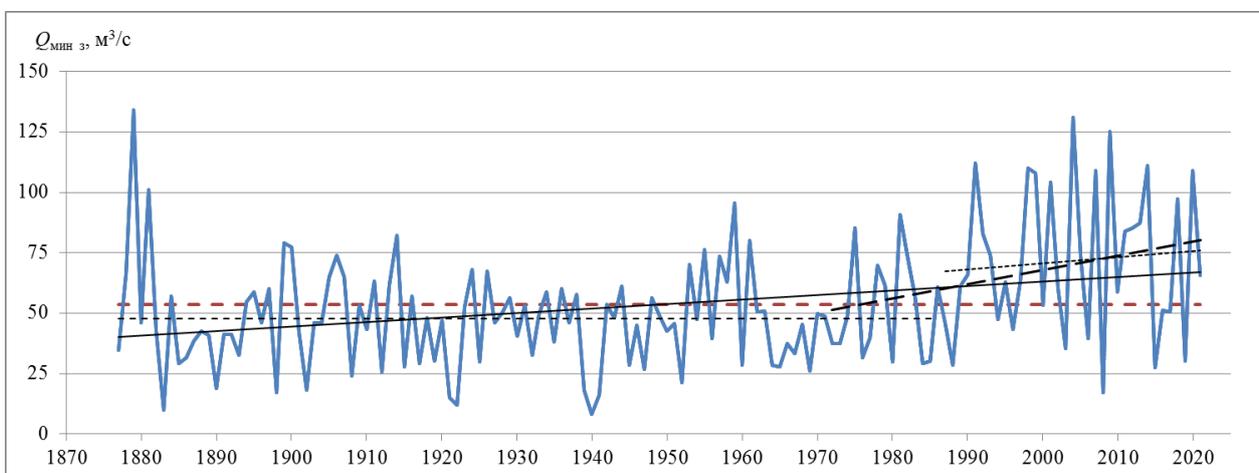


Рисунок 6 – Хронологический ход минимальных зимних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска

Таблица 12 – Основные статистические характеристики минимальных зимних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, г.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	53,5	47,8	71,7	65,8
$C_v$	0,48	0,43	0,43	0,45
$C_s$	0,89	0,85	0,19	0,44
$r(1)$	0,07	0,02	-0,30	-0,14
$\Delta Q_{10}, \text{м}^3/\text{с}$	1,86	0,02	2,48	5,88
$r$	<b>0,30</b>	0,00	0,08	<b>0,29</b>
$r_{\text{кр}, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{\text{ср}}$	3,47	0,04	3,45	8,93

Наблюдается статистически значимый рост минимальных зимних расходах воды за период с 1987–2021 гг. по отношению к периоду 1877–1986 гг. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет  $t_{кр} = 1,68$ , в то время как  $t$ -статистика = 4,29. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока в целом за рассматриваемый период, а также за период с 1972 по 201 гг., что подтверждается коэффициентами корреляции.

*Наблюдаемые изменения климата*

Тенденции изменения климата за прошедший репрезентативный период времени с учетом мирового опыта проведения таких оценок определены с использованием статистических методов.

При этом в качестве репрезентативных периодов принимаются периоды с 1986 г. по 2010 г. (настоящее время) по отношению к периоду с 1961 по 1985 гг. с учетом мирового опыта определения тенденций изменения текущего состояния климатических характеристик.

Для анализа тенденций изменения климатических данных использовались детальные данные измерений с 1961 по 2010 гг.

в суточном разрезе: среднесуточные значения температуры воздуха и суммы осадков по метеорологическим станциям в бассейне р. Западная Двина – Верхнедвинск, Лепель, Витебск.

Данные получены из Интернета [31] из открытой базы данных международного проекта «European Climate Assessment and Dataset» (Оценка климата в Европе и общая база данных). Координация проекта осуществлялась Королевским метеорологическим институтом Нидерландов (Royal Netherlands Meteorological Institute – KNMI) с участием 56 национальных метеорологических агентств и гидрологических служб.

Для точной оценки изменений климатических характеристик в бассейне реки Западной Двины выполнена статистическая обработка рядов данных в месячном разрезе с определением изменения температуры воздуха (на сколько °C) и количества осадков (на сколько %) за период с 1986 по 2011 гг. по отношению к периоду с 1961 по 1985 гг. с учетом статистической значимости сравнения двух выборок. Поэтому принимается гипотеза о том, что статистически значимых различий не обнаружено.

Результаты определения изменения климатических характеристик за период с 1961 по 2010 год в графическом виде представлены на рисунках 7, 8.

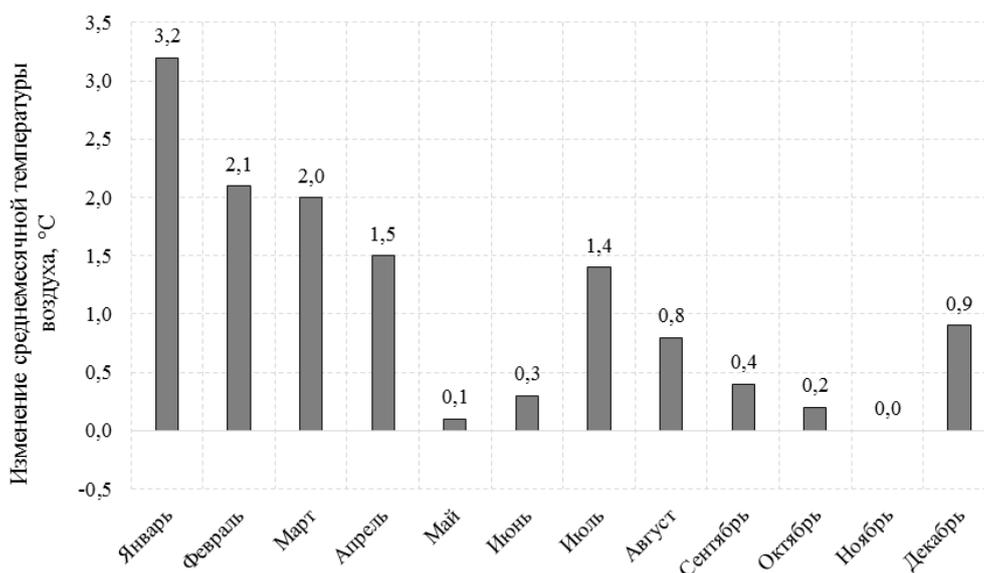


Рисунок 7 – Общая оценка изменения среднемесячной температуры воздуха (°C) в бассейнах рек Западная Двина (1986–2010) – (1961–1985)

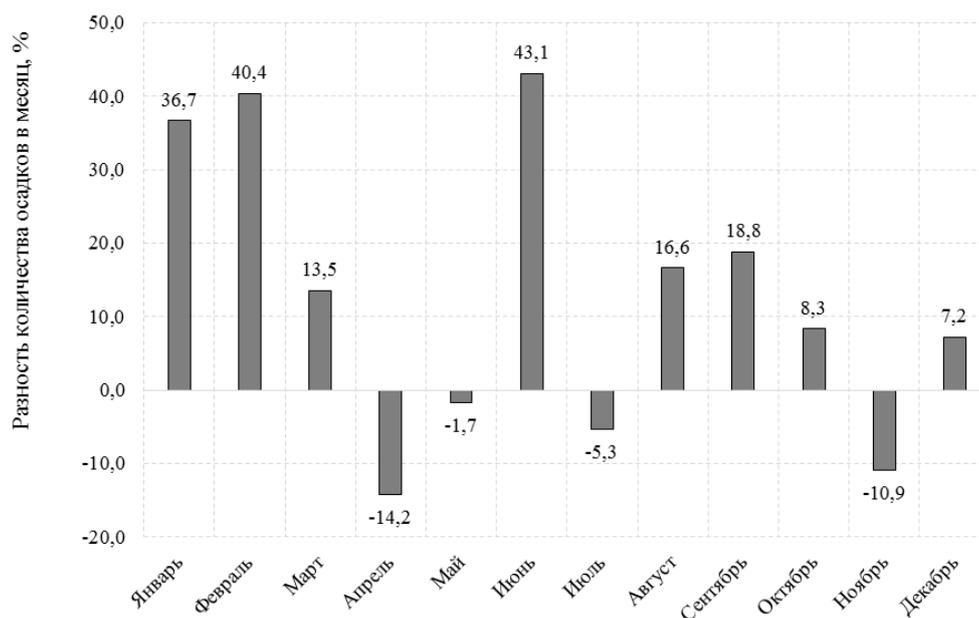


Рисунок 8 – Общая оценка изменения месячного количества осадков (%) в бассейне Западной Двины (1986–2010) – (1961–1985)

Из результатов оценок тенденций изменения климатических характеристик следует, что за последние 50 лет в среднем на 1,1 °С произошло повышение температуры воздуха в бассейне Западной Двины. При этом отмечается существенная неравномерность внутригодового распределения повышения температуры воздуха с максимальным повышением в зимний период – до 3,2 °С в бассейне р. Западная Двина.

В годовом разрезе существенного изменения суммарного годового количества осадков не произошло – в среднем произошло уве-

личение их количества на 11,1 % в бассейне р. Западная Двина. При этом также отмечается существенная неравномерность внутригодового распределения изменения количества осадков: максимальное увеличение на 40 % в зимние месяцы и в июне, а также снижение в апреле на 14 % в бассейне р. Западная Двина.

*Наблюдаемые изменения стока*

Для прогноза стока проведен анализ его изменения за период с 1961 до 2009 гг. (таблицы 13, 14).

**Таблица 13** – Изменение стока в бассейне реки Западная Двина за период с 1961 по 2009 гг. по месяцам

Река	Гидрологический пост	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1985–2009), (1961–1984), м <sup>3</sup> /с, разница, %											
				январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Дриса	Дерновичи	3070	Q <sub>ср.</sub>	32,6	32,0	46,7	94,5	56,0	27,3	20,2	19,0	22,7	31,1	37,5	34,7
			Q <sub>1961–1966</sub>	25,0	21,0	29,8	100,4	59,3	23,1	16,8	15,3	17,8	24,1	30,4	29,7
			Q <sub>1985–2009</sub>	39,3	41,8	61,6	89,3	53,1	31,0	23,2	22,3	27,3	37,6	44,1	39,3
			Δ%	56,9	99,0	106,8	-11,1	-10,3	34,1	37,9	46,3	53,9	56,1	45,2	32,4
Березовка	Саутки	25600	Q <sub>ср.</sub>	2,7	2,7	7,4	11,3	3,5	1,9	1,6	1,3	1,2	2,0	2,8	2,7
			Q <sub>1961–1984</sub>	1,4	1,1	6,7	12,8	3,3	1,5	1,3	1,4	0,8	1,4	2,4	2,0
			Q <sub>1985–2009</sub>	3,9	4,2	8,2	10,0	3,7	2,3	1,8	1,2	1,6	2,5	3,2	3,2
			Δ%	183,0	274,7	22,4	-21,9	13,3	50,3	35,4	-13,2	91,6	73,7	37,0	58,9
Дисна	Шарковщина	33600	Q <sub>ср.</sub>	22,3	22,4	48,7	87,5	32,3	14,9	10,5	9,7	12,5	16,5	19,1	20,6
			Q <sub>1961–1984</sub>	15,6	14,0	44,0	97,6	31,2	13,1	9,3	10,2	11,0	17,1	19,0	19,6
			Q <sub>1985–2009</sub>	28,6	30,2	52,9	78,2	33,3	16,5	11,6	9,3	13,9	15,9	19,3	21,6
			Δ%	82,9	116,2	20,2	-19,9	6,8	25,8	25,4	-8,2	26,8	-7,2	1,5	10,3
Западная Двина	Полоцк	624	Q <sub>ср.</sub>	200	180	356	1080	494	240	176	155	165	202	248	212
			Q <sub>1961–1984</sub>	163	119	234	1120	494	198	162	123	112	139	191	183
			Q <sub>1985–2009</sub>	234	237	468	1043	494	279	189	184	213	260	299	238
			Δ%	43,6	100,1	99,6	-7,0	-0,2	40,9	16,5	49,3	89,8	87,6	56,4	30,4
Западная Двина	Витебск	920	Q <sub>ср.</sub>	131	117	242	835	367	170	127	116	124	157	184	150
			Q <sub>1961–1984</sub>	106	76,5	138	875	366	136	113	84,1	79,4	103	139	126
			Q <sub>1985–2009</sub>	156	155	342	796	368	202	141	146	167	209	228	173
			Δ%	46,7	102,5	148,3	-9,0	0,7	48,2	24,4	73,1	110,3	101,5	63,6	37,1
Оболь	Оболь	4860	Q <sub>ср.</sub>	13,8	13,6	29,1	69,5	24,6	11,2	7,7	7,0	8,5	11,6	15,8	13,6
			Q <sub>1961–1984</sub>	9,90	6,80	21,5	71,2	24,4	8,80	5,30	4,50	4,20	7,40	11,8	11,2
			Q <sub>1985–2009</sub>	17,2	19,3	35,5	68,0	24,8	13,4	9,60	9,10	12,0	15,2	19,1	15,6
			Δ%	74,7	184,6	65,1	-4,4	1,7	52,5	80,9	100,1	184,0	104,2	62,7	38,9
Полота	Янково	1720	Q <sub>ср.</sub>	3,90	3,70	6,10	13,7	7,30	3,70	2,90	2,40	2,60	3,70	5,00	4,50
			Q <sub>1961–1984</sub>	2,80	2,20	4,00	13,7	7,30	2,90	2,50	2,20	2,10	2,90	4,30	4,00
			Q <sub>1985–2009</sub>	5,00	5,10	7,90	13,8	7,30	4,30	3,30	2,70	3,00	4,40	5,60	4,90
			Δ%	79,6	137,9	94,8	1,1	0,9	46,9	31,3	20,3	44,1	51,4	31,2	23,2
Нача	Нача	1200	Q <sub>ср.</sub>	1,10	1,10	2,00	5,00	2,00	0,90	0,60	0,50	0,40	0,60	0,90	1,00
			Q <sub>1961–1984</sub>	0,70	0,50	1,50	5,20	2,00	0,70	0,50	0,40	0,30	0,40	0,70	0,80
			Q <sub>1985–2009</sub>	1,40	1,60	2,60	4,80	2,00	1,00	0,70	0,50	0,50	0,80	1,20	1,20
			Δ%	100,8	198,0	76,9	-8,5	1,8	34,5	31,4	10,7	43,0	92,2	80,3	42,7
Ница	Соколище	10300	Q <sub>ср.</sub>	7,80	7,50	11,8	28,0	16,4	7,40	4,90	4,60	5,50	7,70	9,70	9,70
			Q <sub>1961–1984</sub>	5,40	4,40	7,40	28,0	16,5	5,80	3,80	3,50	4,40	6,10	8,00	8,10
			Q <sub>1985–2009</sub>	10,0	10,3	15,9	28,0	16,4	8,80	6,00	5,60	6,60	9,10	11,3	11,2
			Δ%	83,2	136,8	115,9	0,1	-0,4	50,4	56,9	61,7	51,1	48,9	41,9	38,5
Среднее изменение стока по бассейну Западной Двины, %				<b>83,5</b>	<b>145,0</b>	<b>83,3</b>	<b>-9,0</b>	<b>1,6</b>	<b>42,6</b>	<b>37,8</b>	<b>37,8</b>	<b>77,2</b>	<b>67,6</b>	<b>46,6</b>	<b>34,7</b>

Карты изменения стока за период с 1961 года приведены в приложении В [6].

Таблица 14 – Изменение характерных расходов воды в бассейне реки Западная Двина за период с 1961 по 2009 гг.

Река	Гидрологический пост	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Абсолютные значения, м <sup>3</sup> /с				Относительные значения, %			
			средний	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени	средний	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени
Дриса	Дерновичи	3070	13,2	49,9	4,00	6,80	1,9	-8,8	28,9	45,7
Березовка	Саутки	554	0,14	1,36	0,02	0,04	25,1	-17,8	44,5	100,5
Дисна	Шарковщина	4540	0,81	4,82	0,17	0,28	7,5	-28,5	8,8	19,1
Зап. Двина	Полоцк	41700	529	2487	137	229	26,4	-8,4	23,1	81,5
Зап. Двина	Витебск	27300	270	1366	61,1	73,3	31,5	-9,5	27,5	43,2
Оболь	Оболь	4860	3,24	21,9	0,49	1,07	43,2	-8,9	30,2	88,6
Полота	Янково	1720	3,09	11,4	0,83	1,22	35,8	1,6	30,2	70,3
Нача	Нача	1200	1,17	6,73	0,16	0,50	24,0	-15,9	66,9	101,6
Ница	Соколище	10300	1,11	4,60	0,13	0,26	39,5	-7,9	33,8	95,8

В разрезе среднемесячных значений стока произошли следующие изменения. В целом в бассейне р. Западный Буг отмечается общее снижение стока во все месяцы с большей или меньшей интенсивностью. В бассейне р. Западная Двина снижение стока наблюдается только в апреле и в отдельных случаях в пределах водосборов малых рек. Самые значительные изменения стока произошли в бассейне р. Западная Двина в феврале с его максимальным увеличением от 100 до 270 %.

Сценарии и прогноз изменения климата

Долгосрочные на период 35–50 лет (2021–2050 гг.) сценарии изменения климата для рек бассейна Западной Двины получены путем расчетов по региональной климатической модели CCLM с использованием выходных данных глобальной климатической модели ECHAM5. Расчеты проведены с участием специалистов Вильнюсского университета имени Гедиминаса, имеющих соответствующее программное обеспечение и доступ к серверам программного обеспечения и баз данных указанных климатических моделей (Институт метеорологии Макса Планка – глобальная модель ECHAM5, Потсдамский институт изучения климата – региональная модель CCLM), а также опыт проведения подобных расчетов. Региональная климатическая модель CCLM включает большую часть Европы и наиболее подготовлена для ее использования при прогнозировании изменения климата.

Для моделирования изменения климата бассейна р. Западная Двина, исходя из размера сетки модели, использовались климатиче-

ские данные по метеорологической станции Утена (Литва) и Вилейка (Беларусь); для бассейна р. Западный Буг – Барановичи (Беларусь).

Сценарии изменения климата получены для двух вариантов (сценариев) выбросов парниковых газов (принятых в мировой практике и наиболее используемых для оценок изменения климата сценариев социально-экономического развития человечества) [32, 33]:

I вариант: A1B (*relatively high-emission scenario*) – более «жесткий» сценарий, относительно высокие выбросы парниковых газов за счет быстрого развития экономики и роста численности населения до середины XXI века, а затем замедление роста населения, быстрое внедрение современных технологий и сбалансированное использование энергетических ресурсов;

II вариант: B1 (*low-emission scenario*) – более «мягкий» сценарий, невысокие выбросы парниковых газов, весьма вероятно внезапная глобализация, число жителей изменяется подобно тому, как планируется в сценарии A1, но происходит весьма быстрое превращение экономической системы в информационную, а также общество становится менее потребительским, интенсивное внедрение новых чистых технологий.

Результаты определения сценариев изменения климата для рек бассейна Западной Двины с использованием региональной модели CCLM (с учетом выходных данных глобальной климатической модели ECHAM5) представлены на рисунках 9, 10.

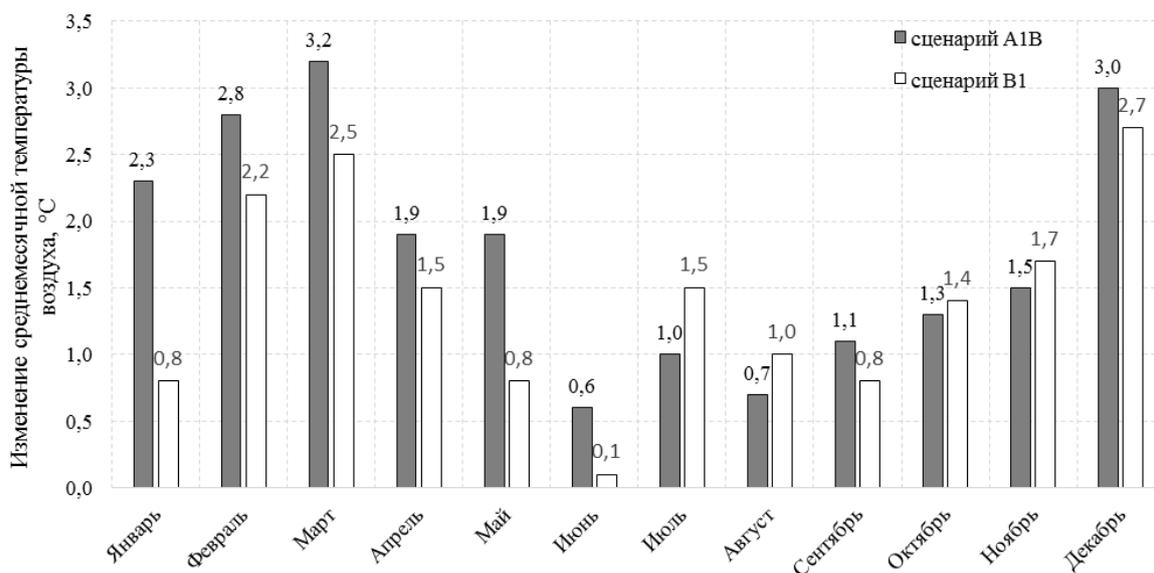
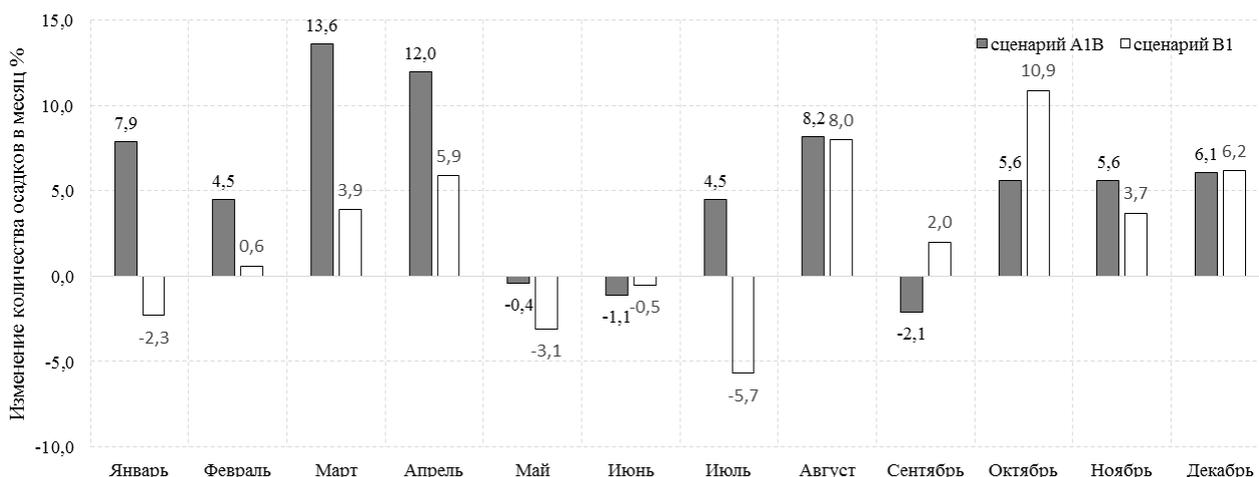


Рисунок 9 – Прогноз изменения среднемесячной температуры воздуха (°C) для бассейна р. Западная Двина до 2035 г. (средняя величина за период 2021–2050 гг.)



**Рисунок 10** – Прогноз изменения месячного количества осадков (%) для бассейна р. Западная Двина до 2035 г. (средняя величина за период 2021–2050 гг.)

В наиболее общем виде по сценариям изменения климата на период 2021–2050 гг. (для среднего значения 2035 г.) для бассейна реки Западная Двина можно сформулировать следующие выводы:

- в среднем за год повышением температуры воздуха на 1,8 °С по сценарию A1B с максимальным повышением температуры в зимние и весенние месяцы (на 3,2 °С);
- в среднем за год повышением температуры воздуха на 1,4 °С по сценарию B1 с максимальным повышением температуры в зимние и весенние месяцы (на 2,7 °С);
- в среднем за год увеличением осадков на 5,4 % по сценарию A1B с незначительным уменьшением количества осадков в летние месяцы и увеличением количества осадков в другие месяцы;
- в среднем за год увеличением осадков на 2,5 % по сценарию B1 с незначительным уменьшением количества осадков в летние месяцы и увеличением количества осадков в другие месяцы.

**Прогноз изменения стока**

По выше приведенной методике выполнены прогнозные оценки по рекам бассейна Западной Двины для двух сценариев развития климата A1B и B1.

При изменении климата получены следующие обобщенные характеристики прогноза стока.

По объемам стока возможна резкая дифференциация между малыми и средними реками. При увеличении стока в среднем за год отмечается неравномерность и разнонаправленность в сезоны и месяцы. Особенно резко прослеживается разная направленность изменения стока в летние месяцы.

В среднем за год возможно увеличение стока на 9 % в бассейне реки Западная Двина. В зимний период прогнозируется не очень значительное увеличение стока на 7–13 %. Весной прогнозируется увеличение стока не более чем на 6–10 %. В летний период возможно увеличение стока на 10–29 %.

В таблице 15 приведен обобщенный прогноз изменения стока для бассейна Западной Двины.

Обобщение выполнено с учетом комбинации сценариев A1B и B1, а также уточнения с использованием мультимодельного ансамбля из четырех сценариев CMIP5, предложенного Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2013 году в Пятом докладе по изменению климата [34].

**Таблица 15** – Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 года для бассейна реки Западная Двина в % от современного состояния

Река – населенный пункт	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовой
Дисна – Шарковщина	12,9	9,6	27,8	0,0	9,7
Дриса – Дерновичи	11,8	1,8	9,9	-0,8	4,3
Березовка – Саутки	12,6	8,9	27,2	2,1	10,5
Западная Двина – Полоцк	10,5	12,3	12,1	0,6	9,0
Западная Двина – Витебск	10,6	10,5	24,2	2,8	9,2
Оболь – Оболь	9,8	11,2	22,4	3,3	9,7
Полота – Янково	8,9	10,3	20,8	0,5	9,0
Нача – Нача	9,4	9,3	22,0	0,7	9,6
Нища – Соколище	9,2	10,2	26,1	0,8	9,3
<b>Среднее по бассейну:</b>	<b>10,6</b>	<b>9,4</b>	<b>21,4</b>	<b>1,1</b>	<b>8,9</b>

**Заключение**

Оценка изменения речного стока бассейна реки Западная Двина за период с 1961 по 2015 год показала некоторое увеличение на 0,5–4,0 %.

Однако, в связи с изменением климата, увеличилась неравномерность изменений стока как по бассейну реки Западная Двина, так и его внутригодовому распределению по сезонам года, а также в зависимости от характеристик рек – большие, средние, малые. Значительные изменения стока произошли в весенний период, связанные со снижением стока весеннего половодья и более ранним его наступлением. В весенний, летний и осенний период прослеживается разная направленность изменения стока, особенно в летний период – его увеличение.

Прогноз стока на период до 2035 года в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 год. По прогнозным оценкам изменение объемов стока также возможна

резкая дифференциация между северной и южной частью республики, между малыми и большими реками. При незначительном изменении стока в среднем за год высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Для рек Западной Двины прогнозируются не значительные изменения стока.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, исходя из различных факторов, основные из которых это:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;

– неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и с неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;

– неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Однако значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохранных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном Западной Двины.

Особенно это актуально в связи с тем, что одним из наиболее негативных последствий изменения климата для речного стока является возможное увеличение частоты и интенсивности неблагоприятных метеорологических и гидрологических явлений. К этим явлениям относятся ливни, засухи, поздние заморозки, наводнения, обусловленные паводками и половодьями, особенно при соединении факторов таяния снега и осадков в виде мокрого снега и дождя, а также возможного увеличения продолжительности половодья.

Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Проблема возникновения маловодных периодов актуальна для рек бассейна Западной Двины. Хотя в настоящее и будущее время нет явных предпосылок для возникновения дефицита водных ресурсов, тем не менее повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала поверхностных водных объектов и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т. п.

Кроме того, за счет возможного увеличения частоты и продолжительности засушливых периодов повышаются риски существенного уменьшения стока малых рек со снижением в них уровня воды, ухудшением ее качества и уменьшением рекреационного потенциала этих рек.

Поэтому разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части совершенствования управления водными ресурсами является актуальной задачей.

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X25KI-036).*

#### Список цитированных источников

1. The role of science in achieving the Sustainable Development Goals / C. Kroll [et al.] // *Nature Sustainability*. – 2019. – Vol. 2, Iss. 9. – P. 804–809.
2. Transboundary Water Governance Scholarship: A Critical Review / R. G. Varady, T. R. Albrecht, S. Modak [et al.] // *Environments*. – 2023. – Vol. 10, Iss. 2. – DOI: 10.3390/environments10020027.
3. Калинин, М. Ю. Водные ресурсы Витебской области / М. Ю. Калинин, А. А. Волчек; под ред. М. Ю. Калинина. – Минск: ООО «Белсэнс», 2004. – 144 с.
4. Западная Двина – Даугава. Река и время / Л. С. Аносова, И. Анцане, А. Брамбис [и др.]; под общ. ред. В. Ф. Логинова, Г. Я. Сегеля. – Минск: Белорус. наука, 2006. – 270 с.
5. Оценка трансграничных водотоков Республики Беларусь. Реализация Конвенции ЕЭК ООН по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер / Совместный проект Европейского Союза и Программы развития ООН «Построение потенциала в области Стратегической экологической оценки и в области реализации природоохранных конвенций в Республике Беларусь». – Минск: ООО «Белсэнс», 2010. – 99 с.
6. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест: Альтернатива, 2017. – 228 с.
7. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (2023). – Минск: ЦНИИКИВР, 2024. – 145 с.
8. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // *Вестник Палесскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчыя навук*. – 2009. – № 1. – С. 22–30.
9. Волчек, А. А. Математические модели в природопользовании. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А. А. Волчек, П. В. Шведовский, Л. В. Образцов. – Минск: Издательский центр БГУ, 2002. – 282 с.

10. Руководство по водным ресурсам и адаптации к изменению климата. – ООН, Нью-Йорк и Женева, 2009. – 143 с.
11. Understanding the role of climate models in climate change projections / S. Kang [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2019. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 273–278.
12. Второе, третье, четвертое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск, 2006. – 143 с.
13. Пятое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 195 с.
14. Воздействие изменения климата на реки и озера района речного бассейна (РРБ) Нямунаса. – 2010. – 57 с.
15. Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective / S. C. Herring, M. P. Hoerling, J. P. Kossin [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2015. – Vol. 96, Iss. 12. – P. S1–S172. – DOI: 10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1.
16. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск: ТетраСистемс, 2008. – 494 с.
17. Прогнозные оценки стока рек бассейнов Западной Двины и Западного Буга в современных климатических изменениях / В. Н. Корнеев, А. А. Волчек, Л. Н. Гертман, И. А. Булак // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 2. – С. 72–85.
18. Волчек, А. А. Влияние изменения климата на водные ресурсы малых рек Беларуси / А. А. Волчек, И. И. Кирвель, С. И. Парфомук // *Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях: материалы научных докладов участников Междунар. науч.-практ. конф., г. Уфа, Республика Башкортостан*. – Уфа: Изд-во: Азтерна, 2014. – С. 106–111.
19. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски / А. А. Волчек // *Вопросы географии / Русское географическое общество*. – Сб. 157. Водные проблемы и их решение / В. М. Котляков [и др.]. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. – С. 81–104.
20. Мезенцев, В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В. С. Мезенцев // *Водные ресурсы*. – 1995. – Т. 22, № 3. – С. 299–301.
21. Волчек, А. А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А. А. Волчек // *Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР)*. – 1986. – № 12. – С. 17–21.
22. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.
23. Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2007. – № 1. – С. 50–62.
24. Валуев, В. Е. К вопросу интерполяции, осреднения и инженерных расчетов воднобалансовых характеристик / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, Н. Т. Юрченко // *Воспроизводство плодородия мелиорируемых земель Сибири: Тр. / СибНИИГиМ*. – Красноярск, 1991. – С. 21–39.
25. Статистические методы в природопользовании: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, П. С. Пойта, П. В. Шведовский. – Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
26. Волчек, А. А. Цикличность годового стока Западной Двины / А. А. Волчек, В. В. Лукша // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В. Прикладные науки. – 2006. – С. 172–177.
27. Волчек, А. А. Структура временных рядов годового стока Западной Двины / А. А. Волчек, В. В. Лукша // *Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника*. – 2006. – № 2 (38). – С. 20–24.
28. Блакітная кніга Беларусі: энцыкл. / Беларускі энцыкл.; рэдкал.: Н. А. Дзісько, М. М. Курловіч, Я. В. Малашэвіч [і інш.]. – Мінск: БелЭн, 1994. – 415 с.
29. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси: справочник / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь; под общ. ред. М. А. Гольберга. – Минск: Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. – 132 с.

30. Волчек, А. А. Минимальный сток реки Западная Двина / А. А. Волчек, О. И. Грядунова // Региональные проблемы экологии: пути решения: Тезисы докладов II междунар. симпозиума в городе Полоцке : в 2-х т. – Полоцк : УО «ПГУ», 2005. – Том I. – С. 98–99.
31. Max Planck Institute for Meteorology – official website. – URL: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/echam5.html> (date of access: 21.05.2025).
32. Изменение климата, 2007. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата : обобщающий докл. / Р. К. Пачаури, Л. Берштейн, П. Бош [и др.]. – Женева : МГЭИК, 2007. – 104 с.
33. Сайт Федеративной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 1998. – URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/v1-7.pdf> (date of access: 21.05.2025).
34. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Резюме для политиков // Материалы МГЭИК. – Женева : МГЭИК, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1> (date of access: 21.05.2025).
16. Loginov, V. F. Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya / V. F. Loginov. – Minsk : TetraSistems, 2008. – 494 s.
17. Prognoznye ocenki stoka rek bassejnov Zapadnoj Dviny i Zapadnogo Buga v sovremennyh klimaticheskikh izmeneniyah / V. N. Korneev, A. A. Volchek, L. N. Gertman, I. A. Bulak // Prirodnye resursy. – 2014. – № 2. – S. 72–85.
18. Volchek, A. A. Vliyaniye izmeneniya klimata na vodnye resursy malyh rek Belarusi / A. A. Volchek, I. I. Kirvel'. S. I. Parfomuk // Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayushchihsvya klimaticheskikh usloviyah : materialy nauchnykh dokladov uchastnikov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Ufa, Respublika Bashkortostan. – Ufa : Izd-vo: Aeterna, 2014. – S. 106–111.
19. Volchek, A. A. Vodnye resursy Belarusi i ekologicheskie riski / A. A. Volchek // Voprosy geografii / Russkoe geograficheskoe obshchestvo. – Sb. 157. Vodnye problemy i ih reshenie / V. M. Kotlyakov [i dr.]. – M. : Media-PRESS, 2023. – S. 81–104.
20. Mezencev, V. S. Gidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya / V. S. Mezencev // Vodnye resursy. – 1995. – T. 22, № 3. – S. 299–301.
21. Volchek, A. A. Metodika opredeleniya maksimal'no vozmozhnogo ispareniya po massovym meteodannym (na primere Belorussii) / A. A. Volchek // Nauchno-tehnicheskaya informatsiya po melioratsii i vodnomu hozyajstvu (Minvodhoz BSSR). – 1986. – № 12. – S. 17–21.
22. Loginov, V. F. Vodnyj balans rechnykh vodosborov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek. – Minsk : Tonpik, 2006. – 160 s.
23. Volchek, A. A. Ocenka transformatsii vodnogo rezhima malyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdejstviem prirodnyh i antropogennyh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
24. Valuev, V. E. K voprosu interpolyatsii, osredneniya i inzhenernyh raschetov vodnobilansovykh harakteristik / V. E. Valuev, A. A. Volchek, N. T. Yurchenko // Vosproizvodstvo plodorodiya melioriruemym zemel' Sibiri: Tr. / SibNII GiM. – Krasnoyarsk, 1991. – S. 21–39.
25. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoye posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenij / V. E. Valuev, A. A. Volchek, P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij. – Brest : Izd-vo Brestskogo politehnicheskogo instituta, 1999. – 252 s.
26. Volchek, A. A. Ciklichnost' godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Prikladnye nauki. – 2006. – S. 172–177.
27. Volchek, A. A. Struktura vremennyh ryadov godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik BGTU. Vodnohozyajstvennoe stroitel'stvo i teplotekhnika. – 2006. – № 2 (38). – S. 20–24.
28. Blakitnaya kniga Belarusi: encykl. / Belarus. Encykl.; redkal.: N. A. Dzis'ko, M. M. Kurlovich, YA. V. Malashevich [i insh.]. – Minsk : BelEn, 1994. – 415 s.
29. Stihijnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Belarusi : spravochnik / M-vo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ; pod obsch. red. M. A. Gol'berga. – Minsk : Belarus. nauch.-issled. centr «Ekologiya», 2002. – 132 s.
30. Volchek, A. A. Minimal'nyj stok reki Zapadnaya Dvina / A. A. Volchek, O. I. Gryadunova // Regional'nye problemy ekologii: puti resheniya: Tezisy dokladov II mezhdunar. simpoziuma v gorode Polocke : v 2-h t. – Polock : UO «PGU», 2005. – Tom I. – S. 98–99.
31. Max Planck Institute for Meteorology – official website. – URL: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/echam5.html> (date of access: 21.05.2025).
32. Изменение климата, 2007. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата : обобщающий докл. / Р. К. Пачаури, Л. Берштейн, П. Бош [и др.]. – Женева : МГЭИК, 2007. – 104 с.
33. Сайт Федеративной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 1998. – URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/v1-7.pdf> (date of access: 21.05.2025).
34. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Резюме для политиков // Материалы МГЭИК. – Женева : МГЭИК, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1> (date of access: 21.05.2025).

### References

1. The role of science in achieving the Sustainable Development Goals / C. Kroll [et al.] // Nature Sustainability. – 2019. – Vol. 2, Iss. 9. – P. 804–809.
  2. Transboundary Water Governance Scholarship: A Critical Review / R. G. Varady, T. R. Albrecht, S. Modak [et al.] // Environments. – 2023. – Vol. 10, Iss. 2. – DOI: 10.3390/environments10020027.
  3. Kalinin, M. YU. Vodnye resursy Vitebskoj oblasti / M. YU. Kalinin, A. A. Volchek ; pod red. M. YU. Kalinina. – Minsk : OOO «Belsens», 2004. – 144 s.
  4. Zapadnaya Dvina – Daugava. Reka i vremena / L. S. Anosova, I. Ancane, A. Brambis [i dr.]; pod obsch. red. V. F. Loginova, G. YA. Segelya. – Minsk : Belorus. nauka, 2006. – 270 s.
  5. Ocenka transgranichnykh vodotokov Respubliki Belarus'. Realizatsiya Konvencii EEK OON po ohrane i ispol'zovaniyu transgranichnykh vodotokov i mezhdunarodnykh ozer / Sovmestnyj proekt Evropejskogo Soyuza i Programmy razvitiya OON «Postroenie potentsiala v oblasti Strategicheskoy ekologicheskoy ocenki i v oblasti realizatsii prirodoohrannykh konvencij v Respublike Belarus'». – Minsk : OOO «Belsens», 2010. – 99 s.
  6. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchedom izmeneniya klimata / A. A. Volchek, V. N. Korneev, S. I. Parfomuk, I. A. Bulak ; pod obsch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
  7. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (2023). – Minsk : CNIKIIVR, 2024. – 145 s.
  8. Volchek, A. A. Paket prikladnykh programm dlya opredeleniya raschetnyh harakteristik rechnogo stoka / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vesnik Paleskaga dzhyzarzhaj'naga universiteta. Seryya pryrodazna'nych navuk. – 2009. – № 1. – S. 22–30.
  9. Volchek, A. A. Matematicheskie modeli v prirodopol'zovanii. Uchebnoye posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenij / A. A. Volchek, P. V. SHvedovskij, L. V. Obratcov. – Minsk : Izdatel'skij centr BGU, 2002. – 282 s.
  10. Rukovodstvo po vodnym resursam i adaptatsii k izmeneniyu klimata. – OON, N'yu-York i Zheneva, 2009. – 143 s.
  11. Understanding the role of climate models in climate change projections / S. Kang [et al.] // Nature Climate Change. – 2019. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 273–278.
  12. Vtoroe, tret'e, chetvertoe nacional'noe soobshchenie Respubliki Belarus' v sootvetstvii s obyazatel'stvami po Ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata / Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – Minsk, 2006. – 143 s.
  13. Pyatoe nacional'noe soobshchenie Respubliki Belarus' v sootvetstvii s obyazatel'stvami po Ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata / Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – Minsk : BelNIC "Ekologiya", 2010. – 195 s.
  14. Vozdejstvie izmeneniya klimata na reki i ozyora rajona rechnogo bassejna (RRB) Nyamunasa. – 2010. – 57 s.
  15. Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective / S. C. Herring, M. P. Hoerling, J. P. Kossin [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. – Vol. 96, Iss. 12. – P. S1–S172. – DOI: 10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1.
- Материал поступил 16.06.2025, одобрен 30.06.2025, принят к публикации 30.06.2025*